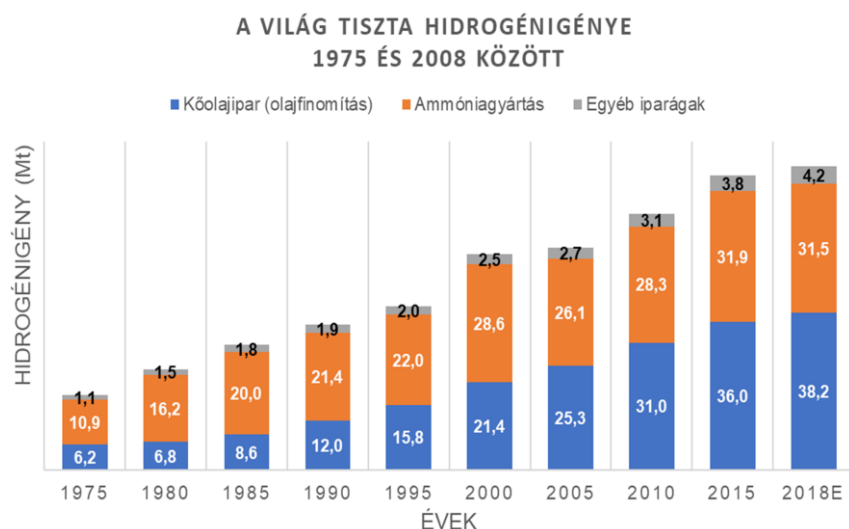


HIDROGÉN-ELŐÁLLÍTÁSI TECHNOLÓGIÁK

Kirchkeszner Csaba – 2021. szeptember 24.

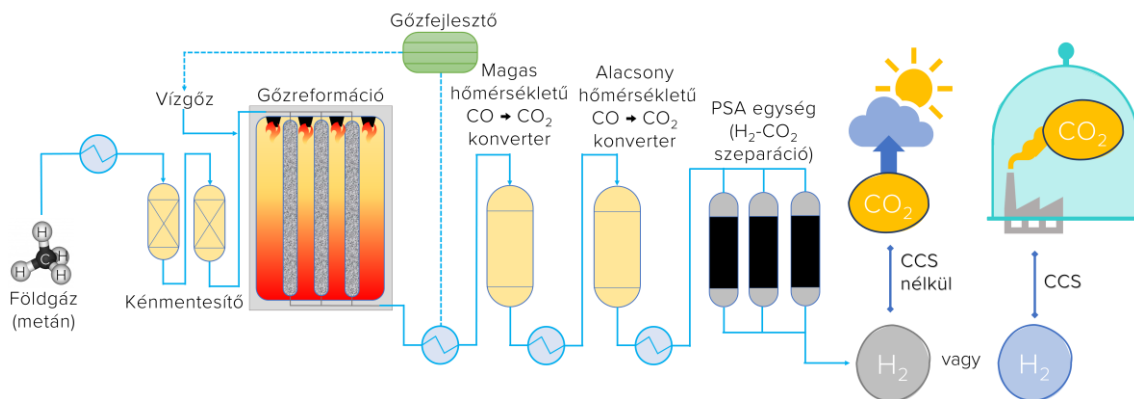
A hidrogén a világegyetem leggyakoribb eleme, azonban nagy reaktivitása miatt főként kötött állapotban – vegyületek formájában – fordul elő. Ennek megfelelően a vegyületeiből történő felszabadításához energiát kell befektetni. **A molekuláris hidrogén (H₂) jelentős vegyipari termék.** Ahogy a Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA) adatai¹ (1. ábra) is mutatják **a vegyipar hidrogénigénye évről évre jelentősen nő.** Az előállított tiszta hidrogén nagyrészt az ammónia- és a kőolajipar használja fel, de emellett vannak egyéb felhasználási területei (pl. acélgyártás) is. Emellett a számos fontos vegyipari termék (pl. metanol, etilén) előállítása során használnak olyan gázelegyeket, melyek hidrogén mellett más gázokat (pl. szén-monoxid, szén-dioxid) is tartalmaznak. **Elemző percünk jelen számában a főbb hidrogén-előállítási technológiákat mutatjuk be, és hasonlítjuk össze azokat egymással.**



1. ábra: A világ tiszta hidrogénigénye 1975 és 2018 között (IEA)

Hidrogén előállítása fosszilis forrásokból és biomasszából

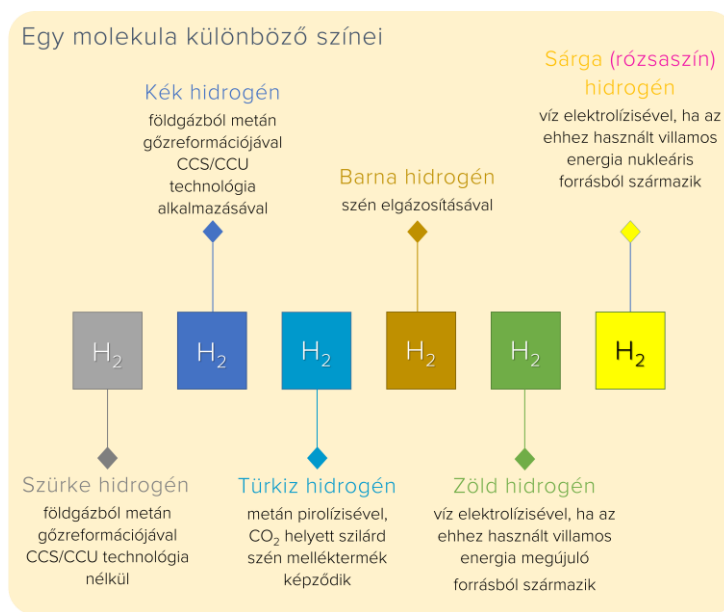
Napjainkban az ipar számára szükséges hidrogén jelentős részét metán (a földgáz fő alkotója) katalitikus gőzreformációjával, parciális oxidációjával (POX) vagy autotermikus reformációjával (ATR) állítják elő. A következőkben röviden áttekintjük e technológiákat, valamint az ezekben rejlő lehetőségeket és ezek korlátait.



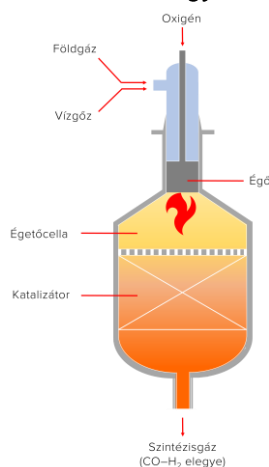
2. ábra: A metán katalitikus gőzreformációjának sematikus folyamatábrája CCS-sel és CCS nélkül (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

¹ <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

A katalitikus gőzreformáció (SMR) lényege (2. ábra), hogy a metánt nikkelalapú katalizátor jelenlétében magas hőmérsékleten (700–1000 °C) és közepes nyomáson (3–25 bar) vízgőzzel reagáltatják. E kémiai reakció során szén-monoxid (CO) és hidrogénelegy (szintézisgáz) képződik. A gőzreformációt megelőzően fontos, hogy a technológiába bevezetett földgázt átvezessük egy kénmentesítő egységen, ugyanis a földgáz kéntartalma rontja a konverziós hatásfokot és katalizátorméregként viselkedik. A magas hőmérséklet alkalmazására pedig azért van szükség, hogy elkerüljük a katalizátor felületén a korom lerakódását. **A katalitikus gőzreformációs folyamat konverziós hatásfoka 70 és 85% között van.** A reakció lejátszódását követően a keletkező H₂- és szén-monoxid (CO)-tartalmú gázelegyet átvezetik egy hőcserélőn, majd egy konverziós cellán, ahol a CO-t CO₂-vé alakítják. Ezt követően leválasztják a szén-dioxidot, és egy speciális adszorpciósi tisztítási művelet révén **nagy tisztaságú (99,9%) hidrogént kapunk.**



A parciális oxidáció (POX) során a földgáz metántartalmát kevés oxigén jelenlétében alakítják hidrogénné és szén-monoxiddá. A POX előnye abban áll az SMR-rel szemben, hogy a parciális oxidáció önként végbemenő, exoterm (hőtermelő) kémiai folyamat, így alapvetően nincs szükség katalizátorra (és katalizátor- regeneráló technológiára) a reakció lejátszódásához, ami csökkenti a termelési költséget. További előnye, hogy a reformáló reaktor sokkal kompaktabb kialakítású, hiszen nincs szükség annyi hőcserélő egységre, mint az SMR-nél. **A POX konverziós hatásfoka metán esetén 60–75% közötti, míg szén esetén csak 55% körüli.** A POX-nál a konverziós hatásfok növelhető katalizátor jelenlétében, azonban számolni kell a kokszkiválással a katalizátor felületén. **A POX rendszereknek jellemzően kisebb az energiahatékonyságuk, mint a gőzreformálásnak a magasabb hőmérséklet miatt, emellett nagyobbak a hőveszteségek is és a hővisszanyerés problematikusabb.** A POX esetén – az SMR-rel szemben – szükség van oxigén-előállító üzemre, ami a beruházási költséget jelentősen növeli.



3. ábra: Az ATR egység felépítése (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

Az autotermikus reformáció (ATR, 3. ábra) során ötvözik a katalitikus reformáció és a parciális oxidáció elvét, vagyis a reformer reaktorba vízgőzt és oxigént is vezetnek, ami a reformációs és oxidációs folyamatok szimultán lejátszódását eredményezi. **A metán autotermikus reformációja során a termikus hatásfok technológiai megvalósítástól függően 60–75% között változik, és a reaktorban mintegy 700 °C van.** **Az ATR technológia beruházási költsége kb. 15–20%-kal alacsonyabb az SMR-énél.**

Egy másik, alapvetően petrokémiára épülő hidrogéngyártási technológia a **szénhidrogének (pl. metán) oxigéntől elzárt körülmények között, magas hőmérsékleten történő hevítése, ún. pirolízise.** A földgáz (metán) pirolízisével levegőtől és víztől elzárt közegben, atmoszférikus nyomáson és mintegy **980 °C** hőmérsékleten előállítható hidrogén. Az eljárás energiaigénye kb. 38 kJ/mol (1 mol hidrogénre vetítve), ami mintegy fele az SMR technológia 1 mol hidrogénre vonatkoztatott energia-igényéhez képest (kb. 64 kJ/mol). **A pirolízis további nagy előnye, hogy nincs szükség CO→CO₂ konverziós és a CO₂-leválasztó**

technológiára, mert a pirolízisnél alkalmazott magas hőmérsékletnek és az inert körülményeknek köszönhetően az adott szénhidrogén elemi alkotóra, vagyis szénre és hidrogénre „esik szét”.

Nem csak a földgáz pirolízisével állíthatunk elő hidrogént. Manapság egyre inkább előtérbe kerülnek a megújuló források – például biomassza – **pirolízisén** vagy **elgázosításán** alapuló technológiák is. **A biomassza pirolízise jellemzően 650–800 °C hőmérsékleten, 0,1–0,5 MPa nyomáson történik, oxigén és levegő kizárásával. A pirolízis során képződik olaj, szén** (biomassza pirolízisekor a szilárd terméket bioszénnek nevezzük), valamint **hidrogén-, szén-monoxid-, -dioxid és szénhidrogének gázelegye**. Jól látható tehát, hogy e technológia során szükség van CO→CO₂ konverziós és a CO₂-leválasztó technológiára, mindemellett a pirolízis körülményeit úgy kell optimalizálni, hogy a melléktermék-képződést minimalizáljuk. Ez utóbbi sokszor megfelelő katalizátort, katalizátor-regeneráló egységet és egyéb segédtechnológiákat igényel.

A biomassza egy másik feldolgozási módja az ún. **elgázosítás**, melyet már a 19. század óta ismerünk, ugyanis így állították elő a közvilágításra használt városi gázt szénből. **Az elgázosítás oxigénnel vagy vízgőzzel történhet igen tág hőmérséklet- és nyomástartományban a reaktor típusától és a kapacitásától függően.** Az elgázosítás során – ahogy a biomassza pirolízise során – sem kapunk tiszta hidrogént, ugyanis mellette főtermékként van jelen a CO, CO₂, melléktermékként pedig a metán, nitrogén, hamu, kátrány. Ennek megfelelően itt is szükség van további technológiai lépésekre ahhoz, hogy kinyerjük a hidrogént vagy éppen a szintézisgázt (CO–H₂ elegye). **Az elgázosítás hatásfoka kb. 45–50%, ami magasabb, mint a biomassza pirolíziséé (35–40%).** Azonban **az elgázosítási technológia költségei 2–2,5-szerese az SMR technológiáénak**, miközben a hatásfoka majdnem feleakkora.

Hidrogén előállítása víz elektrolízisével

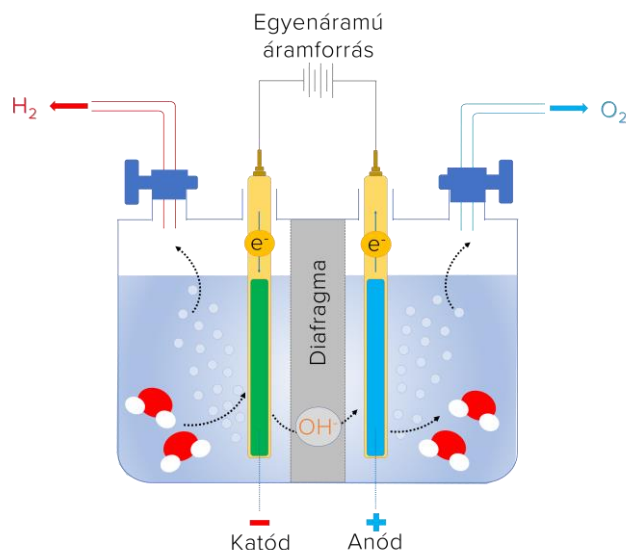
Hidrogén vízből történő előállítása történhet **elektrolízissel**, melynek során elektromos áram hatására kémiai reakciót idézünk elő, történetesen a vízmolekulát bontjuk alkotóira, vagyis hidrogénre (H₂) és oxigénre (O₂). Napjainkban a víz elektrolízisét ipari szinten három különböző típusú elektrolizáló cellával lehet megvalósítani, melyek a következők:

- ➔ **alkalikus (lúgos) elektrolizáló cellák,**
- ➔ **protoncserélő-membrános (PEM) elektrolizáló cellák,**
- ➔ **magas hőmérsékletű elektrolizáló cellák (HTE) vagy szilárd oxidos elektrolizáló cellák (SOE).**

Hogyan épül fel és működik az elektrolizáló cella?

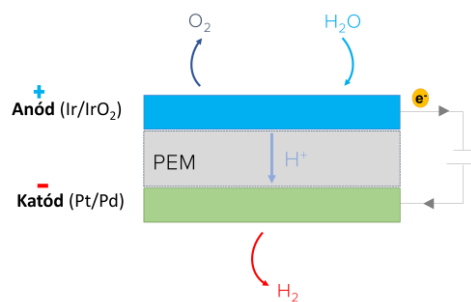
A klasszikus elektrolizáló cella egy ún. **diafragmával elválasztott két félcéllából épül fel, melyek mindegyike tartalmaz egy-egy fémes vezetőt, amik mindegyike megfelelő összetételű elektrolitoldatba merül.** A diafragma egy olyan porózus szerkezetű anyag, amely bizonyos ionokat átenged, azonban a két félcéllában található elektrolitoldat keveredését megakadályozza. **Az elektrolizálócella egyik félcélláját nevezzük anódnak, a másikat katódnak. Az anódon oxidáció, míg a katódon redukció történik.** Amennyiben az előbbieken bemutatott cellát összeállítjuk, s a két fémes vezetőre **egyenáramot** kapcsolunk, akkor megindul az elektrolízis. Az elektrolízis megindulásának szükséges feltétele, hogy **az elektromos potenciálkülönbség a két elektród között egy bizonyos értéknél nagyobb legyen.** (Régen ezt az értéket nevezték **bomlásfeszültségnek**.)

Az alábbiakban e három technológiát mutatjuk be röviden, majd ezeket egymással össze is hasonlítjuk a főbb jellemzőik alapján. Napjainkban még a legelterjedtebb elektrolizáló berendezések az **alkalikus vagy lúgos elektrolizáló cellák (4. ábra)**, ami annak tudható be, hogy kronologikusan ez volt a legkorábbi technológia a fentiekben felsorolt három közül. Ennek megfelelően egyelőre ez a legérettebb is. Ezekben az elektrolizáló cellákban **elektrolitként leggyakrabban kálium-hidroxid 20–40 m/m%-os vizes oldatát használják.** Kálium-hidroxid helyett használnak még nátrium-hidroxidot is, ritkábban pedig nátrium-kloridot (de itt jelentős klórgáz-képződéssel kell számolni). Jól látható ezek alapján, hogy a víz elektrolízise nem a tiszta víz elektrolízisét jelenti. Azért kell a vízhez ugyanis például kálium-hidroxidot adni, mert a tiszta víz elektromos vezetőképessége nagyon kicsi. **A lúgos elektrolizáló cellák üzemi hőmérséklete 70–90 °C és az üzemi nyomás 1–30 bar. Az elektródok fémes vezetői általában nikkel bevonatú rozsdamentes acélból, míg a diafragma cirkónium-dioxidból (ZrO₂) készül.** Az elektrolizáló cellában a cellafeszültség 1,7–2,2 V, míg az **áramsűrűség 0,2–0,6 A/cm². A lúgos elektrolízis hatásfoka 50–60% közötti.** Itt az egyik legnagyobb problémát a lúgos elektrolitoldat által okozott korrózió jelenti.



4. ábra: Az alkalikus (lúgos) elektrolizáló cella felépítése és működése (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

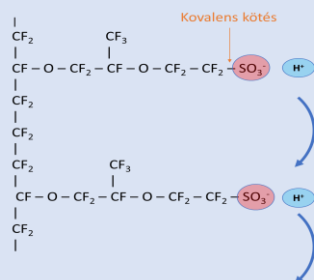
A **protoncserélő membrános (PEM) elektrolizáló cellák** (5. ábra) **lelke a szilárd poli-(perfluor-szulfonsav) alapú membrán**, ami egy vezető polimer. A PEM membrán nagy előnye, hogy a gázokat alig engedi át (gázpermeabilitása kicsi), jelentős a protonvezetőképessége ($0,1 \pm 0,02$ S/cm), emellett rendkívül vékony (20–300 μm), s ennek ellenére magasabb nyomáson (<30 bar) is üzemeltethető. A PEM cellákban **katódként** (ahol a H_2 termelődik) **nemesfémeket** (pl. Pt/Pd) és **anódként** (ahol az O_2 termelődik) **pedig például irídium/irídium-dioxidot (Ir/IrO_2) használnak**, amik **jelentősen megdrágítják a technológiát**. Ugyanakkor a PEM elektrolízissel **nagyobb hatásfok érhető el**, mint a lúgos elektrolízissel, hiszen a PEM-nél **az elektromos áramsűrűség kb. $2 \text{ A}/\text{cm}^2$** . A PEM cellákban a **vízbetáplálás az anód oldalán történik**, ahol a vízmolekulák oxigénre, protonokra és elektronokra esnek szét. A keletkező protonok a protonvezető membránon keresztül jutnak el a katódhoz. Az elektronok a külső áramkörön keresztül biztosítják a cellafeszültséget a reakció lejátszódásához. A katódon pedig a protonok és az elektronok egyesülnek, s hidrogén termelődik.

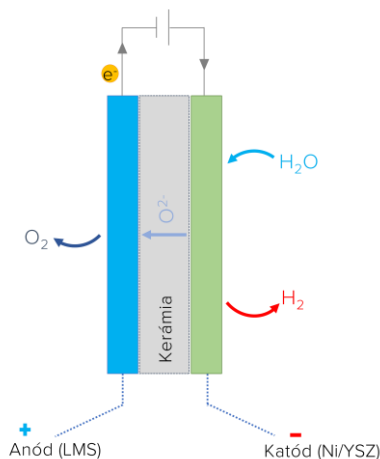


5. ábra: A PEM cella sematikus felépítése (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

Vezető polimerek, avagy fából vaskarika

Sokáig azt gondoltuk, hogy a mesterséges polimerek, a műanyagok csak szigetelőként viselkedhetnek. Hittük mindezt annak ellenére, hogy 1862-ben Henry Letheby előállított elektromos vezető tulajdonságú polianilint. Ma viszont már pontosan tudjuk, hogy márpedig vezető polimerek léteznek. Ilyen vezető polimer a tüzelőanyagcellákban alkalmazott **poli(perfluor-szulfonsav)**, melynek az alapváza a teflonhoz hasonlóan fluorozott szénlánc. Ehhez kapcsolódnak megfelelő oldalláncok, melyek végén található egy negatív töltéssel rendelkező szulfocsoport ($-\text{SO}_3^-$), melyek erős kovalens kötéssel kapcsolódnak az oldallánchoz. S most jön a kémiai trükk. Ha ezt a polimert vizes közegbe helyezzük, akkor a H^+ -ionok az egyik $-\text{SO}_3^-$ -csoportról a másikra „ugrálnak”, akárcsak egy fémes vezetőben az elektronok. Tehát a polimer vezeti a H^+ -ionokat.





6. ábra: A SOE cella sematikus felépítése
(LMS: lantán-stroncium-manganit,
YSZ: ittrium-stabilizált cirkónium,
Forrás: Kirchkeszner Cs.)

Az elektrolizáló cellák harmadik típusáról, a **szilárd oxidos elektrolizálóról** (SOE) általában keveset hallunk még, hiszen e technológia több eleme még fejlesztés alatt van. Ugyan a dán Harold Topose vállalat nem régiben bejelentette, hogy 2022-ben megkezdte egy viszonylag nagy kapacitású (500 MW/év) demonstrációs SOE elektrolizáló üzem építését, melyben a hidrogéntermelés 2023-ban indulhat el. A következőkben tekintsük át, hogyan is épül fel és működik a szilárd oxidos elektrolizáló cella (**6. ábra**). **A SOE felépítését tekintve hasonlít az előbbieken ismertetett cellákhoz,** vagyis található benne anód, katód és elektrolit. **Utóbbi egy kerámia anyag, amelynek üzemi hőmérséklete 600–850 °C (egyes források szerint 900–1000 °C) között van, tehát a SOE esetén a korábbi elektrolizáló celláktól eltérően egy magas hőmérsékletű elektrolízis történik.** Ennek óriási előnye van, hiszen a magas hőmérsékletű üzemnek köszönhetően a SOE-nél a reakciókinetikai és a termodinamikai paraméterek kedvezőbb alakulása miatt **a fajlagos energiaigénye alacsonyabb, így a hatásfoka magasabb (85% körüli), mint a PEM-nek vagy a lúgos elektrolízisnek.** A magas üzemi hőmérséklet további előnye, hogy **nincs szükség drága katalizátorra,** s akárcsak a PEM úgy a SOE is **nagy áramsűrűség mellett képes működni,** ami lehetővé teszi, hogy **kompakt, kisméretű moduláris elektrolizáló egységeket alakítsunk ki,** melyek kaszkádszerűbe kapcsolhatók. Mivel magas hőmérsékletű rendszerrel van szó, ezért

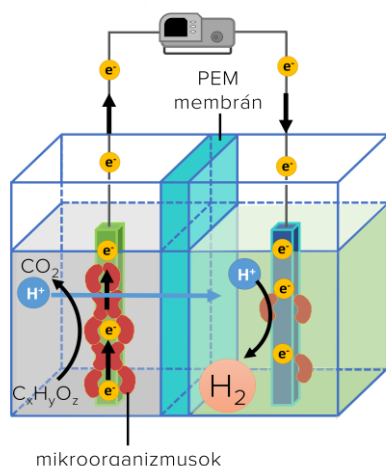
valójában **itt nem a víz, hanem a vízgőz elektrolízise történik.**

A szilárd oxidos elektrolizáló cella katódján a vízmolekula elemi hidrogénre (H_2) és **oxidionra (O_2)** bomlik (redukció), majd az oxidion a kerámia elektroliton keresztül áthalad (ez a kerámia gyakorlatilag csak az oxidion számára átjárható). Ezután az anódon – a külső áramkörön áthaladó és a cellafeszültség fenntartásáért felelős elektronokkal egyesülve – oxigénmolekulává (O_2) oxidálódik.

Az eddigiek alapján úgy tűnhet, hogy megtaláltuk a karbonmentes hidrogéngyártás elveszett(nek hitt) szent grálját. Azonban meg kell említeni, hogy **a SOE-nak is vannak komoly hátrányai** úgy mint **a hosszú indítási és leállítási idő** (hiszen a kerámia felfűtése és lehűtése csak lassan, szakaszosan történhet), **a működés közbeni terhelésváltoztatásra (load-following) csak lassan és korlátozottan képes.** Tehát **a SOE-t főleg zsinórüzemű hidrogéntermelésre lehet használni,** ebből adódik az, hogy **időjárásfüggő megújuló energiaforrásokhoz kevésbé illeszthető.** Olyan helyen érdemes egy SOE üzemeltetni, ahol konstans módon nagy mennyiségben áll rendelkezésre hulladékhő, amit felhasználhatunk a SOE üzemi hőmérsékletének eléréséhez.

Mikrobiológiai elektrolízis

A biomérnökség, a környezetvédelem, az elektrokémia diszciplínák együtteseként született meg néhány évvel



7. ábra: Példa a mikrobiális elektrolizáló cellára (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

ezelőtt az az innovatív és ígéretes technológia, mely magas szervesanyag-tartalmú vízből mikroorganizmusok működésének és az elektrolízis ötvöztetésével képes hidrogén előállítására. Ezt a technológiát nevezzük **mikrobiológiai elektrolízisnek.** A mikrobiológiai elektrolizáló cellákat 2005-ben egymástól függetlenül fejlesztették ki a *Penn State* és a *Wageningen Egyetem* kutatói a zöld hidrogéntermelés és a szennyvízkezelés jegyében. A mikrobiológiai elektrolizáló cella (MEC) anódoldalán a pl. szennyvízben található szerves anyagokat (ún. szubsztrátot) megfelelő mikrobák oxidálják. A mikrobiális oxidáció eredményeként szén-dioxid, protonok (H^+) és elektronok keletkeznek. Az elektronok a külső áramkörön keresztül az anódtól a katód irányába „vándorolnak”, míg a protonok a két félcellát elválasztó protoncsere membránon keresztül jutnak el a katódhoz, ami a hidrogén előállításának helyszíne. Egy ilyen MEC cellát mutat be a **7. ábra**. A MEC cellák működtetéséhez jóval kisebb elektromos feszültség (0,2–0,8 V) szükséges, mint a korábban ismertetett elektrolizáló cellákéhoz. Emellett környezeti körülmények (20 °C körüli hőmérsékleten és atmoszférius nyomáson) üzemeltethetők. Azonban ez a technológia még fejlesztés alatt áll, és számos kihívással kell szembe nézniük a fejlesztő

mérnököknek, kutatóknak, mire e technológia felnő a nagyüzemi szintre. **Azonban a MEC technológiának vitathatatlan előnye, hogy egyszerre alkalmazható szennyvíztisztításra és hidrogéntermelésre is.**

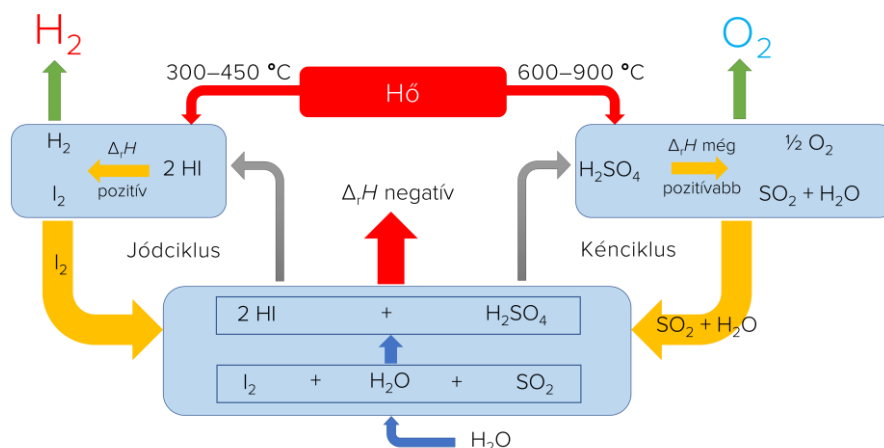
Példa a félüzemi kísérletekre

Kutatók és mérnökök már végeztek félüzemi kísérleteket, például építettek egy 1000 liter térfogatú mikrobiológiai elektrolizátort egy pincészet szennyvizének tisztítására és H₂-termelésre. A cella 24 elektródmodult (egyenként 6 anódot és 6 katódot tartalmaz egy modul), összesen 144 elektródpárt tartalmazott. Az anódok anyaga grafit, a katódoké pedig rozsdamentes acél volt. A cellában alkalmazott feszültség 0,9 V volt. 1000 liter szennyvíz elektrolízisével 190 liter hidrogéngázt tudtak termelni. Emellett a tanulmány szerzőinek sikerült jelentős mértékben csökkenteni a szennyvíz szervesanyag-tartalmát.

Hidrogén előállítása víz termolízisével

A nagy tisztaságú hidrogén gyártásának szempontjából kézenfekvő megoldásnak tűnhet a víz termikus bontása, mely egy reakciólépésben lejátszódik, s eredményeként hidrogént és oxigént kapunk. Azonban ahhoz, hogy a termolízis ipari szempontból számottevő mértékben végbe menjen rendkívül magas (>2500 °C) hőmérséklet szükséges. Ilyen nagyságú hőigény nagyüzemi biztosítása gyakorlatilag teljesíthetetlen, nem beszélve arról, hogy a keletkező gázelegyet az alkotók szerint szeparálni kell. Ezért számos katalitikus termokémiai ciklust vezettek be, amelyek révén ugyan több lépésben, de jóval kisebb hőmérsékleten és a direkt termolízisnél sokkal jobb hatásfokkal nyerhető vízből hidrogén. Több ígéretes reakciósort leírtak már, a végső recept azonban még mindig nincs a kezünkben. Az egyik ilyen katalitikus termokémiai ciklus az ún. kén-jódciklus (8. ábra), mely három fő kémiai reakcióból épül fel:

- (1) **Bunsen-reakció**, melynek során a víz, a jód és a kén-dioxid reakciójával kénsavat és hidrogén-jodidot állítunk elő. Ez a reakció egy hőtermelő (exoterm) reakció.
- (2) A **kénsav** 600–900 °C hőmérsékleten történő **bontása** kén-dioxiddá, vízzé és oxigénné.
- (3) A **hidrogén-jodid** 300–450 °C hőmérsékleten történő **bontása** jóddá és **hidrogénné**.



8. ábra: Hidrogén előállítása vízből kén-jódciklussal

(ΔH az adott kémiai reakció lejátszódását követő entalpia-változás, régebben reakcióhő, Forrás: Kirchkeszner Cs.)

Látható, hogy a ciklus nagy előnye, hogy az egyes vegyületek visszanyerhetők és újra felhasználhatók az eljárásban. A kén-jódciklus valójában egy kémiai „hőerőgép”, melynek hatásfoka 50% körüli. Azonban van két komoly hátránya: az egyik a magas (kb. 900 °C-os) hőmérsékletigénye, míg a másik, hogy jelentős mennyiségű korrozív anyag van a rendszerben, így olyan szerkezeti anyagok (pl. nióbium-tantál ötvözetek, nikkel alapú szuperötvözetek) beépítését igényli, melyek ellenállóak a magas hőmérséklettel és a nagyfokú korrózióval szemben. Ezek a tényezők jelentősen megnövelik a beruházási költségeket.

Jód-kéncikluson alapuló hidrogéntermeléssel kapcsolatos kísérletek zajlanak a Japánban, ahol a High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) program keretein belül megépített 30 MW termikus teljesítményű magas hőmérsékletű, héliumhűtésű atomreaktort (HTGR) használják a kén-jódcikluson alapuló hidrogéntermelés hőforrásaként.

A bemutatott fontosabb technológiák főbb paramétereit az **1. táblázatban** foglaltuk össze.

Összességében elmondható, hogy napjainkban már sokféle különböző kémiai technológia áll a hidrogéngyártás szolgálatában. Megállapítható, hogy a legjobb hatásfokkal és ár/érték aránnyal még mindig a metán gőzreformációján alapuló technológiák rendelkeznek, azonban egyre előkelőbb helyen állnak a zöldnek mondható elektrolízis alapú technológiák is (különösen a PEM elektrolízis). Ugyanakkor az is látható, hogy számos környezetbarát hidrogéntermelési technológia áll fejlesztés és méretnövelés alatt, melyek várhatóan ún. többcélú technológiaként (például H₂-termelés és szennyvíz-tisztítás) fognak üzemelni.

1. táblázat: A bemutatott hidrogén előállítási technológiák összehasonlítása
(Adatok forrása: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-production-cost>)

Technológia	Nyersanyag	Jellemző üzemi hőmérséklet	Jellemző üzemi nyomás	Képződik CO ₂ ?	Hatásfok	Tőkekötség	Előállított hidrogén ára
SMR (CCS nélkül)	földgáz (metán)	700-1000 °C	3-25 bar	igen	70-85%	180,7 M\$	2,08 \$/kg
SMR (CCS-sel)						226,4 M\$	2.27 \$/kg
Parciális oxidáció	földgáz (metán)	700-750 °C	5-150 bar	igen	55-75%	n.a.	n.a.
ATR (CCS-sel)	földgáz (metán)	700 °C	30-50 bar	igen	60-75%	183,8 M\$	1.48 \$/kg
Metán pirolízise	földgáz (metán)	980 °C	1-30 bar	nem, szénképződés	55-60%	n.a.	1.59-1,70 \$/kg
Biomassza pirolízise	biomassza	650-800 °C	n.a.	igen + egyéb gázok	35-50%	53.4-3.1 M\$	1,25-2,20 \$/kg
Biomassza elgázosítása	biomassza	>700 °C	n.a.	igen + egyéb gázok	35-50%	149.3-6.4 M\$	1,77-2.05 \$/kg
Alkalikus elektrolízis	H ₂ O + elektromos áram	70-90 °C	1-30 bar	nem	50-60%	270 \$/kWe	kb. 5-7 \$/kg
PEM elektrolízis	H ₂ O + elektromos áram	50-80 °C	<70 bar	nem	55-70%	400 \$/kWe	kb. 6-8 \$/kg
SOE elektrolízis	H ₂ O + elektromos áram	700-900 °C	1 bar	nem	75-85%	>2000 \$/kWe	n.a.
Termokémiai vízbontás	H ₂ O + hő	850-950 °C	n.a.	nem	45-50%	kb. 2100 M\$	2,45-2,63 \$/kg